

Elektrische Energie - auch im Informationszeitalter unentbehrlich

Leonhard, Werner

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 49, 1998,
S.263-280



J. Cramer Verlag, Braunschweig

Elektrische Energie - auch im Informationszeitalter unentbehrlich

Von **Werner Leonhard**, Braunschweig*

(Eingegangen am 06.09.1999)

1. Einführung

Durch Bereitstellung von Energie und Vermittlung von Information hat die Elektrotechnik das Entstehen einer von körperlicher Arbeit fast völlig befreiten, mobilen und kommunikativen Gesellschaft möglich gemacht; allerdings beschränkt die gegenwärtige Diskussion sich fast ausschließlich auf die durch das Vordringen der Halbleitertechnologie in molekulare Dimensionen ausgelösten Fortschritte der Informationstechnik. In einigen Jahren soll es in Halbleiterkristallen integrierte Transistoren mit nur noch einigen Elektronen geben, was mikroelektronische Bausteine mit kaum vorstellbaren Packungsdichten ermöglicht, man spricht von 100 Mio Transistoren auf einem Chip. Die Übertragungsleistung schon heute existierender globaler Kommunikationssysteme wird dadurch weiter gesteigert und das Problem z. B. der Sprachübersetzung in Echtzeit wird lösbar. Die Informationstechnik gilt deshalb mit Recht als eine Schlüsseltechnologie der Zukunft.

Angesichts dieses Potentials erscheint es vielen nicht lohnend, sich noch mit Energietechnik zu befassen, einer Wissenschaft, wo die wesentlichen Fragen längst gelöst scheinen und die an den Hochschulen nur noch wenig Interesse findet, denn wer will schon seine berufliche Zukunft an ein überholtes Fach binden; in Amerika haben die meisten Hochschulen ihre energietechnischen Fachrichtungen mangels Nachfrage geschlossen und die Industrie bezieht die benötigten Ingenieure aus dem Ausland.

Der Bedarf an professionellen informationstechnischen Dienstleistungen, etwa im Geschäftsleben oder in der Wissenschaft, mag in der Tat unbegrenzt erscheinen, doch ist das bei der privaten Kommunikation, die das Massengeschäft tragen soll, keineswegs sicher; wenn der Reiz der Neuheit vorbei ist, sind Sättigungserscheinungen unvermeidlich. Wer will stundenlang im Internet surfen, dabei vor allem Werbung konsumieren und sich dann zur Entspannung einem der angebotenen 200 Fernsehprogramme zuwenden, wo es wiederum Werbung gibt?

Die heute in Industrieländern verbreitete Meinung, angesichts eines zunehmend deregulierten Energiemarktes sei die nötige elektrische Energie beliebig und zu wettbewerbsbedingt abnehmenden Preisen jederzeit abrufbar, außerdem – wenn man nur die Kosten nicht scheute – aus erneuerbaren und umweltverträglichen Quellen zu gewinnen, wird sich längerfristig als Fehlspekulation erweisen. Energie ist heute über die Regio-

* Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. Werner Leonhard · Institut für Regelungstechnik · Technische Universität Braunschweig · Hans-Sommer-Straße 66 · D-38106 Braunschweig

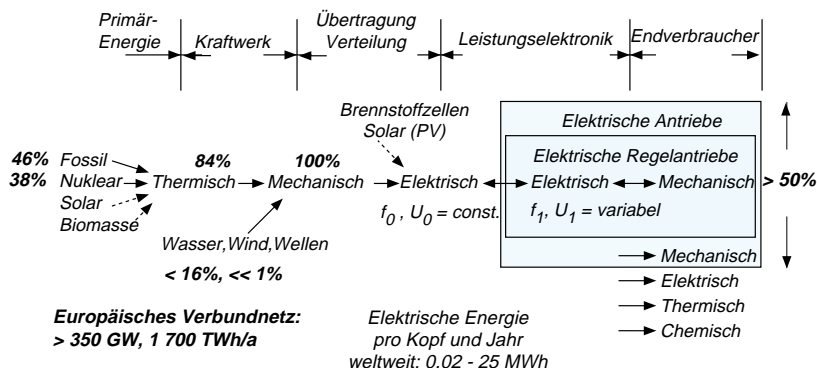


Abb. 1: Von der Primärenergie zum Endverbraucher, eine Folge von Umwandlungsprozessen

nen der Erde sehr ungerecht verteilt und die Mengen, die global gebraucht würden, um der wachsenden Bevölkerung eine einigermaßen ausgewogene Versorgung zu bieten, sind nirgendwo in Sicht; bei den heutigen Möglichkeiten der Migration kann dieser Kontrast auf Dauer nicht bestehen bleiben. Ihre Begrenztheit macht Energie zu einem kostbaren Gut und der zunehmende Bedarf in bevölkerungsreichen Entwicklungsländern wird zu einer Neubewertung der Energiequellen führen, was in den Industrieländern den Abschied von Illusionen bedeutet. Die Energietechnik wird uns deshalb noch beschäftigen, wenn die Multimedia-Euphorie längst abgeklungen ist.

Abb. 1 zeigt den mehrstufigen Umwandlungsprozess elektrischer Energie, von den verschiedenen, oft ortsgebundenen Primärquellen bis zum Endverbraucher. Mit den folgenden Überlegungen soll zunächst gezeigt werden, wie das heutige elektrische Energiesystem sich im Lauf der letzten 100 Jahre entwickelt hat und wie es in Zukunft aussehen könnte.

2. Flächendeckende elektrische Energieversorgung mit Drehstrom und sinusförmigen Spannungen – es gibt keine Alternative

Nach einem historischen Wettstreit mit dem Gleichstrom am Ende des vergangenen Jahrhunderts hat sich Drehstrom konstanter Frequenz für die Übertragung und Verteilung elektrischer Energie weltweit durchgesetzt. Seitdem sind kontinent-überspannende Drehstromnetze mit hunderten von Gigawatt Leistung entstanden, während Gleichstrom auf besondere Anwendungen beschränkt ist, etwa in der Verkehrs- und Verfahrenstechnik, bei der Punkt-zu-Punkt Übertragung zwischen Netzen verschiedener Frequenz oder, am unteren Ende des Leistungsspektrums, in nachrichtentechnischen Geräten aller Art. Abb. 2 zeigt als Beispiel das aus mehreren synchronen Gebieten bestehende europäische Hochspannungs-Verbundnetz. Dabei kommt Drehstrom mit sinusförmigen Spannungen zum Einsatz, der heute fast ausschließlich mit rotierenden Synchrongeneratoren erzeugt wird, Bild 3, ihre Drehzahl bestimmt die Netzfrequenz, und die kinetische Energie in den rotierenden Massen der Generatoren und Motoren wirkt als Puffer im Sekundenbereich.

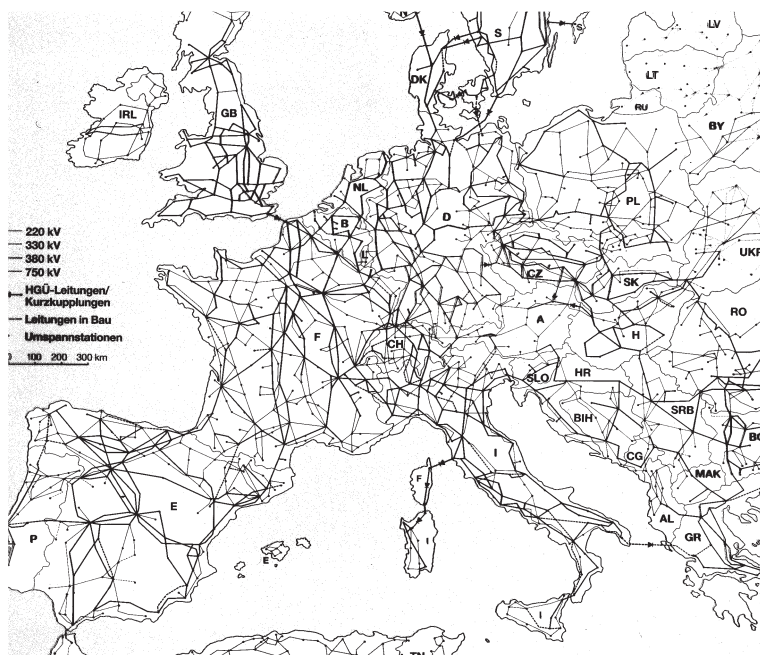


Abb. 2: Europäisches Hochspannungsverbundnetz

Magnetische Flußverkettung:

$$\alpha = \pi/2$$

$$\Phi(t) = r \int B(\alpha - \varepsilon(t)) d\alpha$$

$$\alpha = -\pi/2$$

Induzierte Spannung:

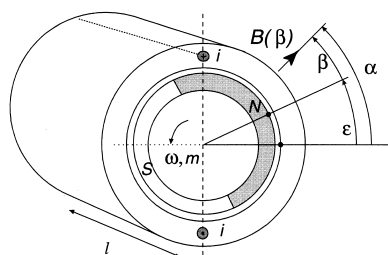
$$e(t) = d\Phi/dt = 2 r l \omega B(\pi/2, t)$$

Drehmoment:

$$m(t) = 2 r l B(\pi/2, t) i$$

Leistung:

$$\underline{m\omega} = 2 r l B(\pi/2, t) i \omega = 2 r l \omega B(\pi/2, t) i = \underline{ei}$$



Radiale Flußwelle $B(\beta)$
bewegt sich mit dem Rotor

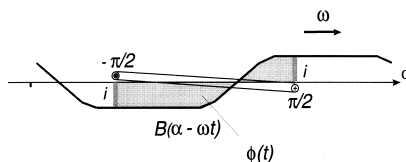


Abb. 3: Mechanisch – elektrische Energieumwandlung mit Generatoren

Da die dem Netz entnommene elektrische Leistung statistischen Gesetzen gehorcht und jederzeit Störungen, etwa durch Blitzeinschlag, möglich sind, Kraftwerke aber nicht momentan ans Netz gebracht werden können, ist es unerlässlich, immer eine gewisse ungenutzte Momentanreserve einsatzbereit zu haben; andernfalls droht die Gefahr eines Netzzusammenbruchs. Dies ist ein wichtiges Motiv für den weiträumigen Energieverbund, wie er sich im Laufe der Zeit entwickelt hat; je größer das Netz, desto leichter läßt sich die statistisch benötigte Reserveleistung bereitstellen. Im Grenzfall eines dezentralen Netzes mit nur einem Generator müßte ein gleich großer leerlaufender Generator vorhanden sein, um die Versorgung sicherzustellen. Dies spricht gegen eine völlig dezentral aufgebaute Energieversorgung, wie sie manchmal vorgeschlagen wird.

Angesichts der wachsenden Bedeutung neuer Energiequellen und der Möglichkeit, durch Leistungselektronik die Kurvenform der Spannungen und Ströme verlustarm nahezu beliebig zu ändern, stellt sich die Frage, ob das heutige elektrische Energienetz künftigen Anforderungen genügt und die Möglichkeit bietet, alle verfügbaren Energiequellen zu nutzen. Elektrische Energie ist ja nicht wirtschaftlich speicherbar, sondern muß bereitstehen, wenn der Verbraucher eingeschaltet wird. Da bei natürlichen Quellen auch das Angebot stark fluktuiert und nicht mit dem wechselnden Bedarf korreliert ist, bleibt der regionale Verbund auf jeden Fall notwendig und sinnvoll. Einfache physikalische Überlegungen zeigen außerdem, daß die Übertragung und Verteilung mit sinusförmigem Drehstrom auch künftig eine Voraussetzung für die flächendeckende Versorgung darstellt, ganz abgesehen von den Investitionen in das bereits bestehende Netz.

Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen auf Freileitungen und Kabeln gehorcht den Gesetzen der Elektrodynamik, linearen partiellen Differentialgleichungen, wo Spannungen und Ströme nach Zeit und Ort differenziert werden. Sinusförmige Größen sind die einzigen periodischen Funktionen, die durch diese Gleichungen stationär in sich abgebildet werden. In Abb. 4 ist dies anhand eines Beispiels demonstriert, wo eine 100 km lange Freileitung mit sinus- oder trapezförmiger Speisespannung gespeist wird; im einen Fall entsteht

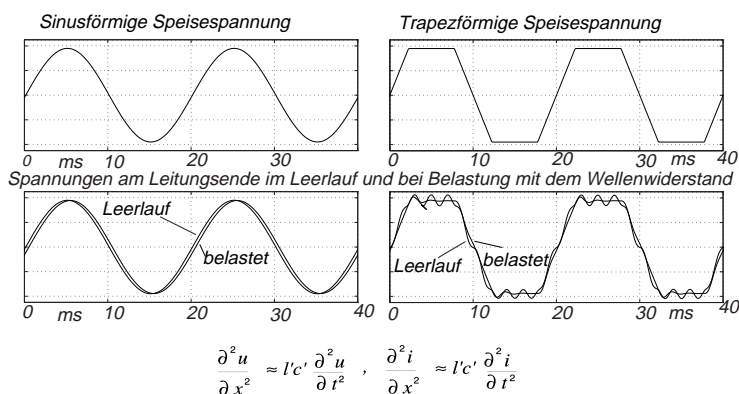


Abb. 4: Spannungen am Ende einer 100 km – Freileitung bei sinusförmiger und trapezförmiger Speisespannung

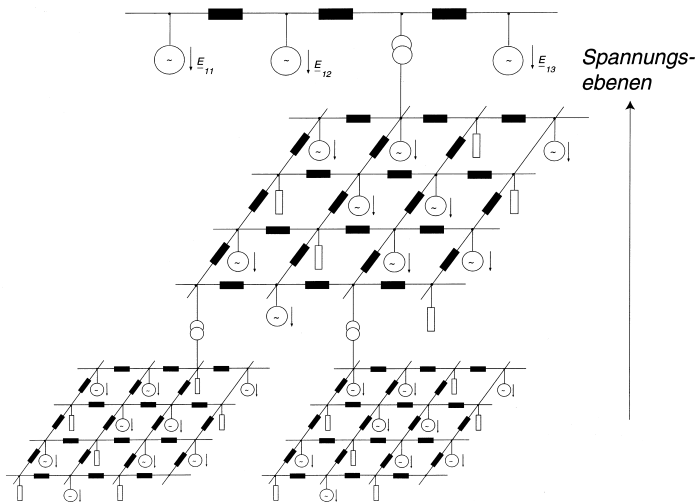


Abb. 5: Drehstrom-Verbundnetz nur mit sinusförmigen Spannungen

wieder eine sinusförmige Ausgangsspannung, deren Betrag und Phase sich bei Belastung nur geringfügig ändert, im andern Fall gibt es last- und ortsabhängige Verzerrungen, die eine Netzbildung unmöglich machen, da die Spannung an jeder Stelle des Netzes eine andere Kurvenform hätte. Die Sinusform bleibt also aus physikalischen Gründen auch im Zeitalter der Leistungselektronik eine Voraussetzung für die Bildung ausgedehnter Netze, Abb. 5.

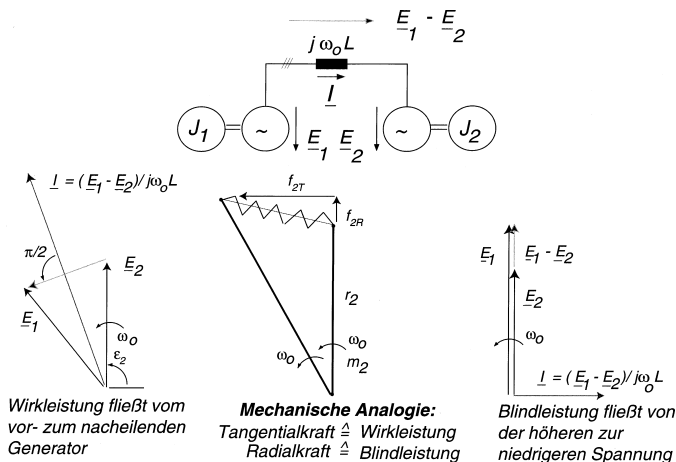


Abb. 6: Stabilität einer Drehstromübertragung

Ein wichtiger Gesichtspunkt ist auch die Stabilität der Übertragung, was aus Abb. 6 im Prinzip deutlich wird. Wenn zwei sinusförmige synchrone Generatorspannungen E_1 und E_2 über eine Induktivität, etwa einen Transformator oder eine kurze Freileitung, verbunden sind, wird bei einer kleinen störungsbedingten Winkelverdrrehung die voreilende Maschine generatorisch, d.h. bremsend, die nacheilende motorisch belastet, was die Maschinen „in Tritt“ hält. Diese synchronisierenden Drehmomente sind eine Voraussetzung der (statisch) für $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 < \pi/2$ stabilen Energieübertragung mit Drehstrom; ähnliches gilt für die Blindleistung, wo Leitungs- und Transformator-Reaktanzen die Ausgleichsströme zwischen benachbarten Generatoren verlustarm begrenzen, anders als dies bei Gleichstromverbindungen mit den notwendigerweise kleinen Widerständen der Fall wäre.

Schließlich bietet das Drehstromnetz mit drehzahlgeregelten Synchrongeneratoren auch eine einfache Lösung, um die im Netz irgendwo angreifenden elektrischen Belastungen nach technischen oder wirtschaftlichen Gesichtspunkten auf die verschiedenen Generato-

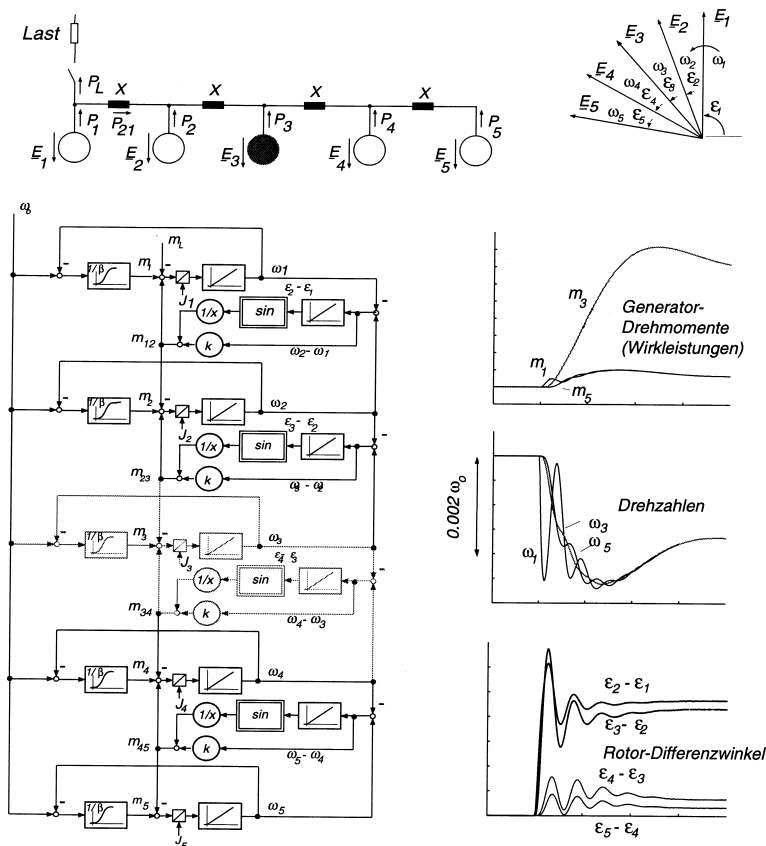


Abb. 7: Lastverteilung mit drehzahlgeregelten Generatoren

ren zu verteilen. Dies ist die Aufgabe der Drehzahlregler aller Antriebsmaschinen, die auch dem Schutz bei Überlastung und im Störfall dienen. Da die Frequenz im gesamten Verbundnetz stationär gleich ist, läßt sich über die proportional wirkenden Drehzahlregler die zugehörige Leistung jedes Generators einstellen, der sich dann auch nach Kräften an der Deckung eines schwankenden Leistungsbedarfs im Netz beteiligt; ähnlich ist es in einem längeren Zeitmaßstab auf der übergeordneten Netzregelebene.

Die Wirkungsweise der sog. Primär- und Sekundär- Regelung, die sich seit Jahrzehnten bewährt hat, sei anhand eines Rechenbeispiels illustriert, Abb. 7. Dabei ist vereinfachend angenommen, daß mehrere drehzahlregelte Generatoren unterschiedlicher Größen über eine Drehstromleitung verbunden sind; am Leitungsende, bei Generator 1, greife eine Last an, die auf alle Generatoren verteilt werden soll. Im Beispiel übernimmt der leistungsmäßig dominierende Generator 3 statisch den größten Teil der Last, die Maschinen an den Enden der Leitung pendeln während des Einschwingvorgangs in Gegenphase. Der Verlauf der Ausgleichsvorgänge wird dabei wesentlich durch die kinetische Energie der Maschinen bestimmt. Im Endzustand stellt sich nach Maßgabe der Regler eine geringfügig reduzierte Frequenz ein.

Ähnliche Schwingungsvorgänge sind auch in Verbundnetzen zu beobachten, Abb. 8. Als vor einigen Jahren wegen größerer Störungen im europäischen Verbundnetz ein vorübergehendes Leistungsdefizit von über 8 GW entstand, führte dies zu einer Frequenzänderung von weniger als 0.5 Hz, was die außerordentliche Robustheit des Verbundbetriebes deutlich macht.

Aus allen diesen Gründen ist es höchst unwahrscheinlich, daß man das bewährte Drehstromsystem künftig durch ein anderes Übertragungs- und Verteilungsverfahren ersetzen kann. Sollte eines Tages, wie in Abb. 1 angedeutet, aus Solargeneratoren oder Brennstoffzellen ein nennenswerter Leistungsanteil über unverzüglich reagierende elektronische Umrichter und ohne mechanische Zwischenstufe in das Netz eingespeist werden, so entfielen die natürliche Stabilisierung des Netzes durch die rotierenden Massen und müßte durch eine aktive Regelung ersetzt werden; es ist nicht sicher, daß große Netze sich damit ähnlich sicher betreiben ließen, wie das heute der Fall ist.

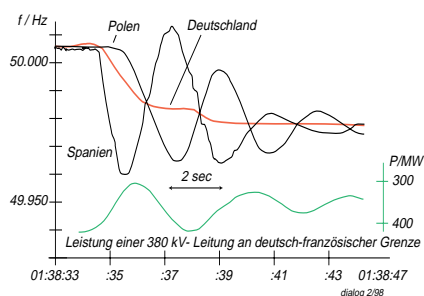


Abb. 8: Gemessener Ausgleichsvorgang im europäischen Verbundnetz nach einer 900 MW Störung im spanischen Netz

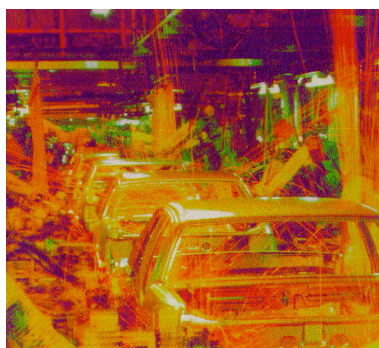


Abb. 9: Roboterbetriebene Schweißstraße in der Automobilproduktion

3. Verlustarme elektrische Energiewandlung mit Leistungselektronik

Sinusförmiger Drehstrom ist offenbar die einzige Möglichkeit einer flächendeckenden Energieversorgung; häufig sind aber bei der Anwendung, etwa für eine Schweißstraße in der Automobilproduktion, Abb. 9, ganz andere Stromverläufe nötig. Jeder der dutzenden von Robotern hat mindestens 6 Freiheitsgrade, die über elektrische Regelantriebe gesteuert werden; hinzu kommen die Ströme in den Schweißzangen. Die resultierende elektrische Leistung läßt sich nur statistisch beschreiben und von einem sinusförmigen Verlauf der Ströme kann keine Rede sein. Die Steuerung aller Ströme erfolgt dabei mit leistungselektronischen Umrichtern unter Verwendung von Halbleiter-Schaltelementen, wie dies in Bild 10 angedeutet ist.

Die Steuerorgane sind elektronische Schalter, die mit pulsweitenmoduliertem Einschaltverhältnis bei Frequenzen zwischen einigen hundert Hz und einigen hundert kHz, je nach Art und Leistung der Bauelemente, betätigt werden. Damit lassen sich z.B. aus einer Gleichspannungs-Quelle Ströme und Spannungen nahezu beliebiger Kurvenform erzeugen, wie sie der Verbraucher benötigt; die maximale Strom-Änderungsgeschwindigkeit ist nur durch die Speisespannung und die von der verwendeten Schaltfrequenz abhängige Bandbreite der Regelung bestimmt. Die momentane Leistungsdichte in den aktiven Elementen ist sehr hoch (MW/cm^3), was Umschaltzeiten im Mikrosekundenbereich und eine sichere regelungstechnische Begrenzung der wesentlichen Systemgrößen notwendig macht.

Leistungselektronische Umrichter stehen heute bis zu vielen Megawatt in großer Vielfalt zur Verfügung. Sie sind immer dann unentbehrlich, wenn Erzeuger oder Verbraucher mit nichtsinusförmigen Strömen und Spannungen oder mit Spannungen veränderlicher Frequenz an das Verbundnetz gekoppelt werden sollen, Abb. 11; damit sind sie eine

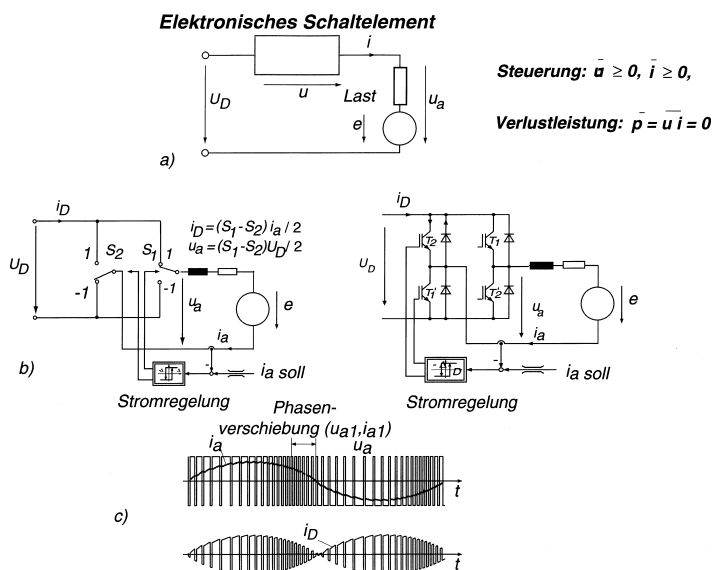


Abb. 10: Prinzip der Leistungselektronik mit gesteuerten Schaltern

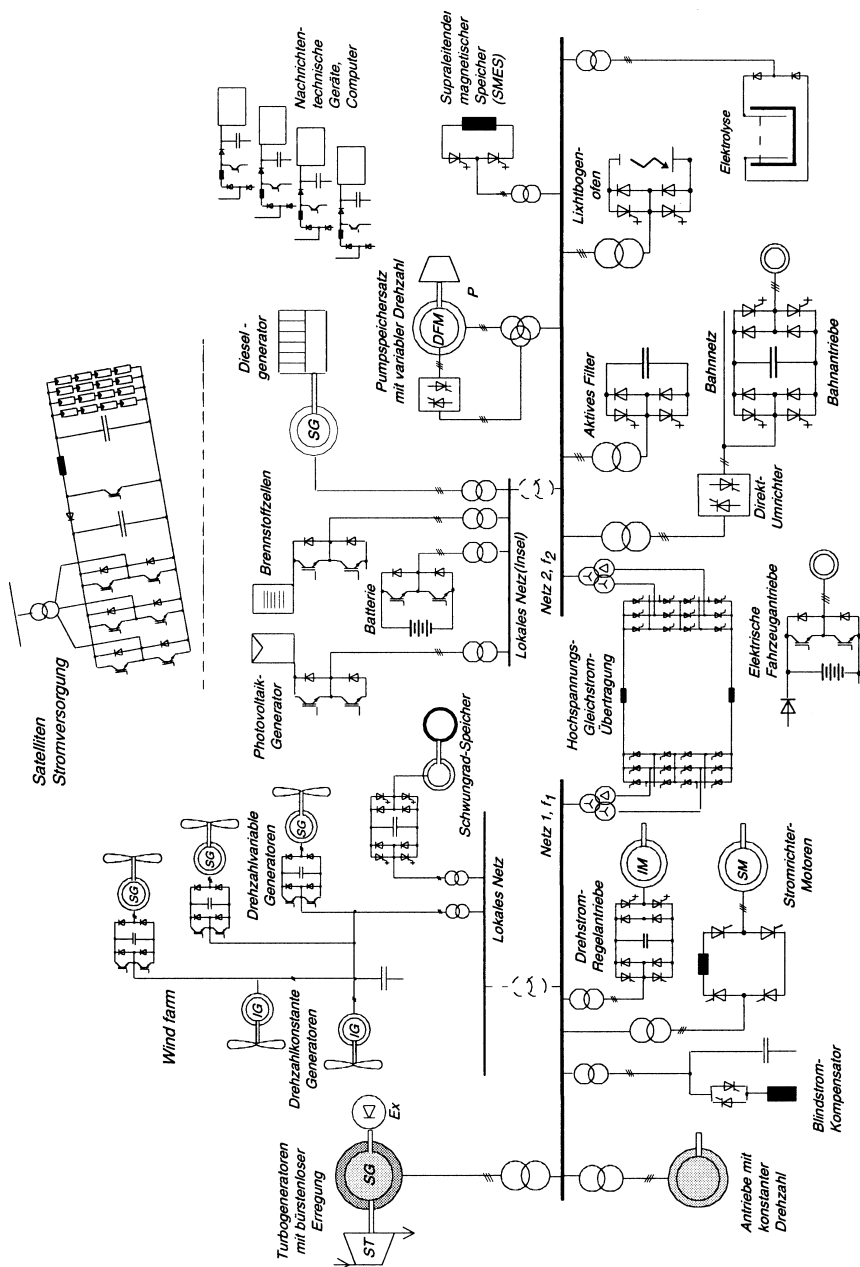


Abb. 11: Leistungselektronik in der elektrischen Energieversorgung

wesentliche Voraussetzung für die Nutzung sich erneuernder Energiequellen, bei denen, wie im Fall der Photovoltaik, zunächst ein mit der solaren Einstrahlung schwankender Gleichstrom entsteht.

Die Leistungselektronik und die zur Steuerung und Regelung eng mit ihr verbundene Mikroelektronik sind ein wichtiges und hochaktuelles Forschungsgebiet der elektrischen Energietechnik. Während das Drehstromnetz mit sinusförmigen Spannungen auch künftig für die Übertragung und flächenhafte Verteilung elektrischer Energie gebraucht wird, ist Leistungselektronik immer dann unentbehrlich, wenn es darum geht, auf der Erzeuger- und Verbraucherseite flexible Schnittstellen zu schaffen; eine freizügige Nutzung erneuerbarer Energiequellen wäre ohne sie nicht möglich.

4. Welche Primärenergie für die künftige globale Versorgung?

Aus der bisherigen Darstellung wird deutlich, daß es keine praktische Alternative zum elektrischen Drehstrom-Verbundnetz gibt, um eine flächendeckende Energieversorgung zu gewährleisten, vom großen Kompressorantrieb bis zum Kleinstverbraucher an der Steckdose, etwa eine Waschmaschine, den Elektrorasierer oder einen PC; die Anpassung an das Netz kann jeweils über eine leistungselektronische Schnittstelle erfolgen.

Die nächste Frage ist, welche in der Natur vorkommende Primärenergie für die Erzeugung der Elektrizität zur Verfügung steht. Dabei gibt es große regionale Unterschiede; so wird die Elektrizität in Norwegen zu über 99 % aus Wasserkraft erzeugt, in Brasilien sind es 90 %. Für die Partnerländer des westeuropäischen Verbundnetzes gilt der in Abb.1 angegebene Energiemix, wo Länder mit 75 % Wasserkraftanteil (Österreich) solchen mit nur 4 % (Deutschland) gegenüberstehen. Die Hauptlieferanten in Europa sind thermische Kraftwerke mit fossilem Brennstoff (46 %), hauptsächlich Braunkohle, Steinkohle und zunehmend Erdgas, außerdem Kernenergie (38 %); der Anteil von Wind und Sonne liegt unter 1% und spielt allenfalls regional eine Rolle.

Übers Jahr gesehen, haben manche Länder eine etwa ausgeglichene elektrische Energiebilanz (Deutschland, Österreich), was kurzzeitige grenzüberschreitende Energieflüsse aber nicht ausschließt, andere sind ausgeprägte Energie-Exporteure (Frankreich) oder Importeure (Italien). Kurzfristig besteht aber im Verbundnetz ein freier Energieaustausch, der von physikalischen Gesetzen bestimmt wird. Weitere Energienetze, die z.T. über Gleichstromverbindungen mit dem westeuropäischen Netz gekoppelt sind, gibt es in Nord- und Osteuropa, außerdem natürlich in allen anderen Industrieregionen.

Während der Gesamtenergie-Verbrauch in Industrieländern durch Einführung verlustmindernder Produktionsverfahren, sparsamere Verkehrsmittel oder bessere Wärmedämmung kaum noch zunimmt, eher etwas zurückgeht, steigt die elektrische Energie immer noch an, im letzten Jahr um fast 3 %. Viel größere Steigerungen sind aber in Ländern zu beobachten, die an der Schwelle zur industriellen Entwicklung stehen; am Beispiel Argentiniens ist die zeitliche Entwicklung des Energiebedarfs eines solchen Landes zu sehen, Abb. 12 b. Wie die Statistik der pro Kopf-Erzeugung von elektrischer Energie zeigt, Abb. 12 a, bestehen zwischen den Regionen gewaltige Unterschiede bis um den Faktor 1.000, was einen dramatischen Anstieg des globalen Primärbedarfs in kommenden Jahren erwarten läßt.

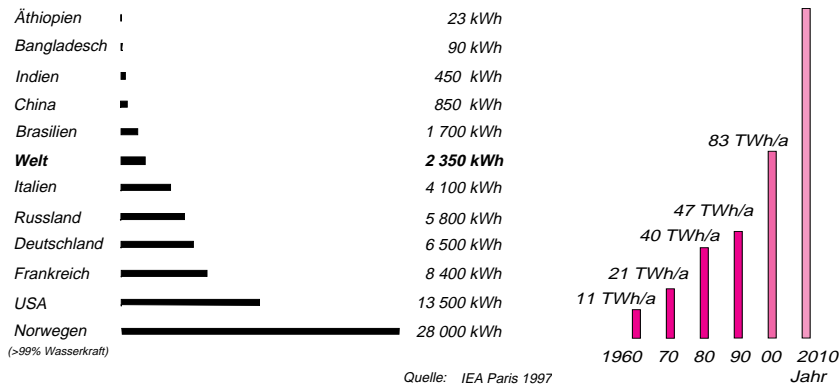


Abb. 12a: Elektrische (pro Kopf) Energieerzeugung 1996 im globalen Vergleich

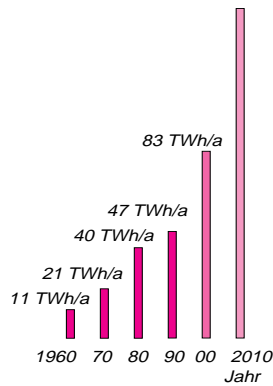


Abb. 12b: Elektrischer Energieverbrauch am Beispiel Argentiniens. Bevölkerung: 35 Mio

Angesichts der enormen Verbrauchszahlen in den Industrieländern wird viel von Einsparungen gesprochen, doch ist es schwierig, das zweifellos vorhandene Potential zu aktivieren. In der Industrie besteht über die Kosten bereits ein starker Anreiz für die Verwendung energiesparender Verfahren, was sich in zusätzlicher Automatisierung und wegen der guten Regelbarkeit, etwa bei elektrischen Antrieben, in einem steigenden Anteil der elektrischen Energie auswirkt. In Haushalten, die in Deutschland etwa ein Viertel der elektrischen Energie abnehmen, zählt vor allem der mit Elektrizität mögliche Komfort; abgesehen von den sparsamer werdenden Haushaltsgeräten werden hier Appelle zum freiwilligen Sparen wenig nützen, bei einer Verknappung wären Zwangsmaßnahmen in Form zeitweiliger Stromsperrern unvermeidlich.

Ein Blick auf die in Abb. 13 gezeigten statischen Reichweiten der wichtigsten Energiequellen (bei konstantem Verbrauch) gibt Hinweise auf die heute bestehenden Optionen; die

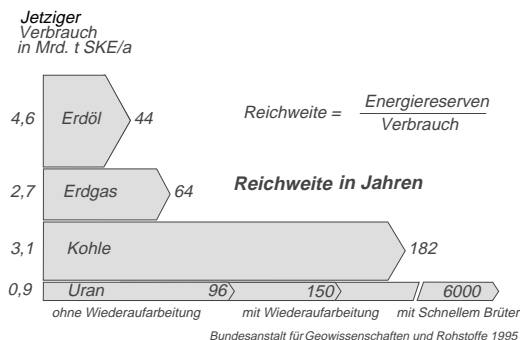


Abb. 13: Statische Reichweiten der Energieträger

Reichweiten ändern sich natürlich durch neue Funde, doch sind bei steigendem Verbrauch irgendwann Grenzen erreicht.

Unter den fossilen Energieträgern ist vor allem Kohle für die elektrische Energieversorgung unentbehrlich; sie ist noch vergleichsweise reichlich vorhanden, doch werden die Abbaubedingungen schwieriger und bei Braunkohle wachsen die Widerstände gegen die Landschaftsverwüstung durch den Tagebau, Abb. 14; insgesamt nimmt die Emission von CO_2 zu. In den Industrieländern wird deshalb seit einigen Jahren der Einsatz von Erdgas forciert, nachdem kombinierte Gas/Dampf-Prozesse mit sehr hohem Gesamtwirkungsgrad nahe 60% entwickelt wurden; wegen des höheren Wasserstoff-Anteils gehen dabei die CO_2 -Emissionen zurück, wozu sich die Regierungen international verpflichtet haben. Allerdings reicht Erdgas nur wenig länger als Öl, das wegen der einfachen Speicherung vor allem für Anwendungen im Verkehr gebraucht wird. Erdgas kann deshalb für die elektrische Energieversorgung nur eine vorübergehende Erleichterung bringen; die Empfehlung an ein Land wie die Ukraine, das weder über eigene Vorkommen noch über die Mittel zum Kauf von Gas verfügt, auf Gaskraftwerke zu setzen, klingt zynisch.

In den umweltbewußten und sicherheitsverwöhnten westlichen Industrieländern hofft man auf eine langfristige Lösung des Energieproblems durch sich erneuernde Quellen, vor allem Wasser, Wind und Sonne, wenn genügend Anbauflächen zur Verfügung stehen, auch Biomasse in Form schnell wachsender energiereicher Pflanzen; ein Beispiel ist der aus Zuckerrohr gewonnene Alkohol als Benzinbeimischung in Brasilien, doch sind auch hier die Grenzen in Sicht.

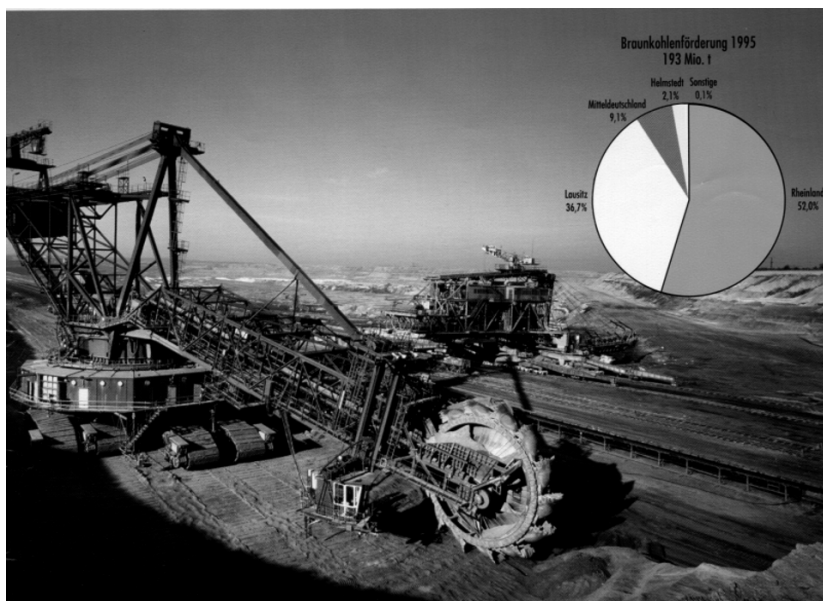


Abb. 14: Braunkohlen-Tagebau, bis zur späteren Rekultivierung eine Mondlandschaft

Wasserkraft ist die noch am einfachsten nutzbare natürliche Energiequelle, da sie eine vergleichsweise hohe Dichte aufweist, steuerbar ist und bei Vorhandensein eines Reservoirs auch gespeichert werden kann; allerdings haben Wasserkraftwerke, abgesehen von der notwendigen Topographie, Auswirkungen auf die Landschaft, was in den dichtbesiedelten Ländern Europas auf Widerstand stößt. Abb. 15 zeigt das Speichergebiet des Kraftwerks Itaipú am Rio Paraná an der Dreiländerecke Brasilien-Paraguay-Argentinien, mit 12.600 MW das größte Wasserkraftwerk der Welt, dessen Maschinen von europäischen Firmen geliefert wurden; seine jährliche Energieproduktion von 75 TWh übersteigt die Gesamt-Erzeugung der Schweiz, dennoch leidet Brasilien an Energiemangel mit den zugehörigen Stromsperrern auch in Großstädten wie Rio de Janeiro. In Europa gibt es kein vergleichbares Wasserkraftpotential und Anlagen wie Itaipú mit einem Reservoir von der doppelten Größe des Bodensees wären nicht durchzusetzen.

Die bei uns seit Jahrhunderten als mechanische Energiequelle genutzte Windkraft hat in den letzten 20 Jahren in manchen Gegenden Amerikas und Europas, hier vor allem in Dänemark und Norddeutschland, eine Renaissance für die Stromerzeugung erlebt; ange-regt durch Steuervorteile und großzügige Einspeisevergütungen wurden Anlagen mit mehreren GW Nennleistung installiert. Allerdings ist Wind eine Energiequelle geringer Dichte, die eine geeignete Landschaft und große Flächen erfordert, Abb16. Auch läßt sich die Energie nicht bedarfsgerecht steuern; man muß dankbar sein, wenn der Wind bläst, auch der Windmüller von Sanssouci konnte sich nicht um die Wünsche des Monarchen kümmern.

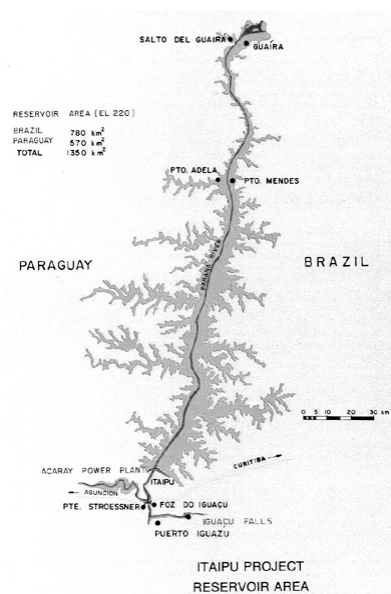


Abb. 15 Wasserkraftwerk Itaipú

Eine Windkraftanlage kommt auch in günstiger Lage nur auf etwa 2.000 Vollaststunden pro Jahr, einen Bruchteil des Wertes bei einem thermischen Grundlastkraftwerk. Für die über den momentanen lokalen Bedarf, etwa für Heizung oder zum Wasserpumpen, hinaus erzeugte Energie benötigt man Speicher; was liegt näher, als sie für gutes Geld in das elektrische Netz einzuspeisen, auch wenn dort vielleicht gerade kein Bedarf besteht und zum Ausgleich andere Kraftwerke gedrosselt werden müssen, bei erhöhtem Brennstoffverbrauch je kWh und steigenden Kosten. Völlig stillsetzen kann man das verdrängte Kraftwerk dennoch nicht, da es während einer wenig späteren Flaute vielleicht gebraucht wird. (Für den kundigen Investor gibt es reichlich Angebote für Windkraftprojekte, die neben der sicheren Rendite ein gutes Umwelt-Gewissen versprechen).



Abb. 16: Windfarm an der Nordseeküste

Zum Ausgleich naturbedingter Schwankungen und Unsicherheiten hat man mehrere Möglichkeiten:

- Böenbedingte Leistungsschwankungen im Sekundenbereich lassen sich mit drehzahlvariablen Windgeneratoren mildern, wo die kinetische Energie des Windrotors und Generators als Kurzzeitpuffer dient; außerdem werden damit die dynamischen Drehmomente im Triebstrang reduziert, was die Lebensdauer der Anlage erhöht. Für drehzahlvariable Generatoren ist Leistungs-Elektronik erforderlich.
- Längerfristige Leistungsschwankungen durch inhomogene Windfelder werden mit Windfarmen reduziert, wo dutzende oder hunderte von Einzelanlagen auf großen Flächen verteilt sein können. Projekte dieser Art bedeuten natürlich einen Eingriff in das Landschaftsbild, vor allem wenn es sich um Feriengebiete handelt, die so zu Industrieviereen verkommen. Daher diskutiert man auch Windkraftgeneratoren auf Plattformen vor der Küste, was wiederum den Naturschutz auf den Plan ruft.
- Wenn die Anlagen über größere Gebiete auch im Binnenland verteilt sind, erhofft man sich durch längerfristige Prognosen Windvorhersagen, die sich bei der Einsatzplanung der Kraftwerke berücksichtigen lassen.

Wenngleich Windkraftanlagen in den letzten Jahren technisch ausgereift sind und Einzelanlagen (bei einer Gesamthöhe von über 100 m) Nennleistungen von 1-2 MW erreichen, ist der am Bedarf eines Industrielandes zu messende Energieertrag bescheiden. Eine 1 MW-Anlage liefert in günstigen Lagen etwa 2 GWh/a und 2.500 solcher Anlagen mit den zugehörigen Landschaftsveränderungen wären nötig, um 1% der in Deutschland verbrauchten elektrischen Energie zu erzeugen (Denkt man sich diese Türme längs der Küste aufgereiht, reichen sie von Holland bis zur dänischen Grenze). Zwar wird man auf die Windenergie mit ihrem Beitrag zur Stromerzeugung von künftig vielleicht einigen Prozent nicht verzichten wollen, doch kann ein dichtbewohntes und hochindustrialisiertes Land sich nicht schwerpunktmäßig darauf stützen. Anders ist es in dünn besiedelten Ländern ohne elektrisches Netz und mit geringem zeitgebundenen Energiebedarf; dort kann Windenergie eine ideale Lösung sein, z.B. um eine dezentrale Wasserversorgung aufzubauen.

Die in den Augen vieler Naturfreunde ultimativ saubere und umweltverträgliche Energiequelle ist solare Strahlung, um bei der Photovoltaik unmittelbar, ohne daß sich außer Elektronen etwas bewegt, in Halbleiterkristallen elektrischen Gleichstrom zu erzeugen, Abb. 17. Auch diese an sich unerschöpfliche Energiequelle schwankt stark und ist nicht steuerbar; was nicht sofort verbraucht werden kann, muß gespeichert oder über geregelte Leistungselektronische Umrichter ins Netz eingespeist werden. Da heutige Solarzellen nur einen Teil des Spektrums nutzen, ist die Ausbeute trotz der hohen Gesamtstrahlung gering, die Kosten von bis zu 2 DM/kWh sind für den Netzbetrieb noch zu hoch.

Anhand einer unter optimalen Bedingungen am Mont Soleil im Schweizer Jura errichteten industriellen Prototyp-Anlage läßt sich das gegenwärtige Potential abschätzen, Abb. 18; auf

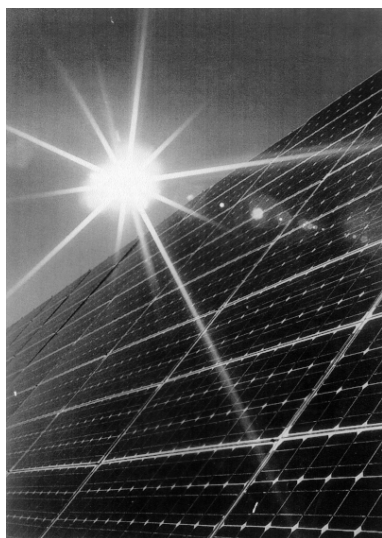


Abb. 17 Photovoltaik-Generator



Abb. 18: Solarkraftwerk am Mont Soleil

einem Areal von schätzungsweise 1 ha wird dort aus 4 500 m² Solarzellen bei einer Spitzenleistung von 500 kW eine elektrische Energie von 720 MWh/a gewonnen, entsprechend 1.440 Vollaststunden pro Jahr. 7.000 solcher Anlagen an vergleichbar sonnigen Standorten mit 70 km² Gesamtfläche wären also nötig, um 1 % der in Deutschland verbrauchten elektrischen Energie zu erzeugen. Bei einer kleineren Demonstrationsanlage am Pumpspeicher-Kraftwerk Geesthacht liegt die mittlere Energieausbeute je m² Solarzellen bei etwa 40 % des Wertes am Mont Soleil, was entsprechend größere Flächen bedeutet. Nur wenig mehr (47 %) liefert das neue 1 MW-Solkraftwerk in Herne. Dagegen ist die Photovoltaik wieder für den netzfernen Einsatz, sei es als Basis-Energieversorgung in Entwicklungsländern oder bei isolierten Anwendungen auch in Industrieländern hervorragend geeignet.

Günstigere Perspektiven bietet die in südlichen Ländern verbreitete thermische Nutzung des Strahlungsspektrums mittels Niedertemperatur-Kollektoren; dabei entsteht zwar keine verkaufsfähige elektrische Energie, doch kann man fossile Energieträger sparen und die CO₂-Bilanz verbessern. Die in Abb. 1 links angedeutete Möglichkeit der thermischen Nutzung von Solarenergie bezieht sich auf Konzentratorsysteme, wo die Strahlung über feste oder nachführbare Spiegel auf punkt- oder rohrförmige Empfänger gerichtet wird, um ein zirkulierendes Medium auf hohe Temperaturen zu bringen; daran schließt sich ein herkömmlicher thermisch/mechanischer Kraftwerksprozeß an. Anlagen dieser Art wurden in Kalifornien gebaut, auch in Europa sind Forschungsarbeiten im Gange; eine großindustrielle Nutzung wäre in Nordafrika denkbar, doch müßten vorher die politischen Voraussetzungen geschaffen werden. Der Energietransport in die industriellen Ballungszentren könnte elektrisch mit hochgespanntem Gleichstrom oder chemisch mit leitungsgeführtem Wasserstoff erfolgen.

Große Hoffnungen setzt man seit einigen Jahren auf Brennstoffzellen, die lange bekannt sind, nach technischen Durchbrüchen aber erst jetzt intensiv zur Produktreife entwickelt werden. Dabei entsteht mit sehr hohem Wirkungsgrad Gleichstrom aus chemischer Energie in Form von Wasserstoff und Sauerstoff. Während sich Niedertemperaturzellen vor allem für Anwendungen im mobilen Verkehr eignen, sind Hochtemperatur-Brennstoffzellen mit Festkörper-Elektrolyten für ortsfeste Anwendungen als dezentrale Kraftwerke im unteren MW-Bereich von Interesse, auch die Kopplung mit einer Gasturbine kann sinnvoll sein; man denkt sogar langfristig über eine umweltverträgliche Endlagerung des bei der Wasserstoffgewinnung aus Erdgas entstehenden CO₂ nach. Brennstoffzellen erschließen damit zwar keine sich erneuernden Energiequellen, sie haben gegenüber Wind und Solarstrahlung aber den Vorzug der verlustfreien Steuerbarkeit, um die elektrische Leistung an den wechselnden Bedarf anzupassen; für die Anbindung ans Netz ist wieder ein leistungselektronischer Umrichter nötig.

Die vorstehende Diskussion zeigt, daß keine der heute bekannten Primärenergiequellen alle an eine künftige globale Energieversorgung zu stellenden Anforderungen erfüllt; es sind dies

- Ausreichende Mengen - Verfügbarkeit,
- Nachhaltigkeit und Zukunftssicherheit,
- Unbedenklichkeit bezüglich der Umwelt hinsichtlich Emissionen und Flächenbedarf,
- absolute Gefahrlosigkeit,
- Erschwinglichkeit.

Insbesondere ist bei intensiver Nutzung keine der Energiequellen völlig harmlos und umweltverträglich, keine ist unbegrenzt verfügbar.

Damit richtet sich der Blick auf die in Abb. 1 eingetragene, bisher aber noch nicht erörterte Kernenergie. Bis Anfang der 80er Jahre galt sie als Energiequelle der Zukunft, die uns von den Beschränkungen fossiler Energiequellen befreien würde. In Frankreich, wo Dreiviertel und in Schweden, wo die Hälfte der elektrischen Energie aus Kernkraft entstehen (der Rest kommt großenteils aus Wasserkraft), war man mit diesen Bemühungen am konsequentesten, aber auch bei uns liefert sie etwa ein Drittel der Elektrizität; auf der ganzen Welt sind mehr als 430 Kernkraftwerke in Betrieb, über 30 sind im Bau. Dann, 1986, ereignete sich die Katastrophe in Tschernobyl, ausgelöst durch leichtfertige Versuche an einem zur militärischen Brennstoffherstellung nutzbaren Reaktor, was im Westen hysterische Reaktionen auslöste; Güterzüge mit „verstrahltem“ Milchkpulver standen jahrelang auf dem Abstellgleis und die Politik machte eine abrupte Kehrtwendung.

Seitdem gilt Kernenergie als geächtet; sie ist, vor allem im Deutschen, ein Unwort, das sich politisch nutzen läßt, wenngleich Reaktoren seit Jahrzehnten verläßlich elektrische Energie liefern und bei uns jährlich an die 150 Mio t CO₂ vermeiden. Man ist eben nicht mit $p < 10^{-x}$ als Restwahrscheinlichkeit eines Unfalls zufrieden, sondern fordert Null, absolute Sicherheit, obwohl (oder gerade weil) es die nicht geben kann, besteigt aber bedenkenlos irgend ein Verkehrsmittel, um bei der nächsten Anti-Atom-Demo dabeizusein. Auch die Endlagerung atomaren Abfalls im 1.000 m tiefen Bergwerkstollen wird wegen der Risiken eines in Jahrtausenden nicht auszuschließenden Wassereintruchs blok-



Abb. 19: Kernkraftwerk: Jahresproduktion > 11 TWh; und nach dem Ausstieg?

kiert, doch hat man keine Hemmungen, das Erdgas zu verbrennen, das vielleicht schon unseren Enkeln fehlt. Wichtig ist der schnelle „Ausstieg“, möglichst in einer einzigen Legislaturperiode, selbst wenn als Ausgleich Atomstrom importiert werden muß. Das einzig Reale einer so irrationalen Politik sind die verlorenen hochwertigen Arbeitsplätze in der Industrie; das ist dann das Problem anderer Leute. Vielleicht hängt unser missionarischer Eifer mit einem durch langen Wohlstand gewachsenen kindlichen Unvermögen zusammen, uns noch ein Leben mit unsicherer Energieversorgung vorzustellen. In nicht weit entfernten Ländern soll es aber intelligente Menschen geben, die lieber mit Atomstrom leben, als in kalten Wohnungen zu frieren oder die letzten Braunkohlenbriketts aus dem Keller zu holen. Und wie sollten die Laptops und Handies aller derer geladen werden, die von der „Verworfenheit der Atomlobby“ ganz gut leben, wenn die Steckdose zeitweilig tot ist?

Es ist wahrscheinlich, wenngleich heute schwer vorstellbar, daß eine sich (auch ohne Ökosteuern) durch steigende Preise ankündigende Verknappung der Energieträger zu einer Neuorientierung führt und eines Tages eine Mehrheit bereit ist, mit einem durch weiterentwickelte Reaktoren nochmals reduzierten atomaren Restrisiko als dem kleineren Übel zu leben; das Bekenntnis zur Umweltschonung durch Verminderung des CO₂-Ausstoßes wäre dann glaubwürdiger. Vielleicht ist bis dahin aber die technische Kontinuität abgerissen, Exportmärkte sind verloren und in Deutschland müssen Kernkraftwerke neu erfunden werden.

5. Zusammenfassung

Die verbreitete Ansicht, die elektrische Energietechnik sei durch die rasante Entwicklung der Informationstechnik nicht nur vorübergehend in den Hintergrund gedrängt, sondern als „klassische“ Technik und Symbol früherer Fehlentwicklungen auf Dauer überflüssig gemacht, ist nicht zutreffend. Im Bericht wird zunächst gezeigt, daß es für eine weiträumige Energieübertragung und flächendeckende Versorgung keine Alternative zum Drehstromnetz mit sinusförmigen Spannungen gibt; um auf der Erzeuger- und Verbraucherseite universell verwendbar zu sein, muß es lediglich durch Leistungselektronik mit der zugehörigen mikroelektronischen Steuerung und Regelung ergänzt werden.

Der andere Grund, weshalb die Energietechnik wieder an Bedeutung gewinnen wird, ist die entgegen allen optimistischen Prognosen bestehende Unklarheit, aus welchen Primärenergiequellen künftige Generationen mit global steigenden Bevölkerungszahlen schöpfen können. Das Potential fossiler und sich erneuernder Energiequellen wird aus heutiger Sicht, d.h. ohne Spekulationen anzustellen, abgeschätzt. Dabei wird deutlich, daß sie nicht reichen, weshalb der Verzicht auf die friedliche Nutzung der Kernenergie ein Irrweg wäre; die Weiterentwicklung dieser Technik ist unausweichlich, auch wenn der Gedanke uns heute noch seltsam vorkommen mag.